Из полученных результатов можно сделать вывод, что оба метода разрешения сингулярности дали практически одинаковый результат. Разница составила 1,1МПа, что является допустимым. Соответственно оба метода можно использовать для разрешения сингулярности.

1. Rukavishnikov V.A., Rukavishnikova E.I. Weighted finite element method for the elasticity problems with singularity/Finite Element Method -Simulation, Numerical Analysis and Solution Techniques. Rijeka, Croatia: InTech, 2018. P. 295-311.
2. Рукавишников В.А. Оптимальный метод конечных элементов для задачи теории упругости с угловой сингулярностью / В сборнике: Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении. Материалы V Дальневосточной конференции с международным участием. Ответственный редактор А.И. Евстигнеев. 2018. С. 105-106.
3. Frei W. Распознавание и разрешение сингулярностей в моделях при построении расчётной сетки / Walter Frei // Блог COMSOL электронный ресурс. 2013. <https://www.comsol.ru/blogs/how-identify-resolve-singularities-model-meshing/>
4. Чугунов М.В., Кечемайкин В.Н., Панин М.В., Полунина И.Н., Махров Г.А. Анализ статической прочности и жёсткости несущих элементов конструкции электромобиля BravoEgo // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». -2016. -Т. 8. -№ 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/134TVN316.pdf>
5. Ефанов С. А. Восстановление деталей полимерными композиционными материалами / Ефанов С.А., Котин А.В., Конаков А.В. // Сельский механизатор. 2015. № 4. С. 34-35.
6. Котин А.В. Компьютерное моделирование функционирования восстановленного соединения "подшипник -корпус" шпиндельного узла полимерными композиционными материалами / Котин А.В., Ефанов С.А. // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф. Х. Бурумкулова. 2016.
7. Ефанов С.А. Обеспечение параметрической надежности ремонтно-технологического оборудования восстановлением шпиндельных узлов полимерными композиционными материалами: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03 / Ефанов Сергей Александрович. – Саранск., 2015. – 131 с.
8. Котин А.В. Моделирование радиального нагружения восстановленного подшипникового соединения шпиндельного узла / Котин А.В., Ефанов С.А. // В сборнике: Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы Межвузовский сборник научных трудов. Саранск, 2017. С. 461-465.

Жураковский В.Н.

**Определение направлений на источники сигналов с применением разложения
этих сигналов на составляющие**

*Московский государственный университет им. Н.Э.Баумана
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-10-2019-08

idsp: ljjournal-10-2019-08

Аннотация

В статье рассматривается метод оценивания направления на два источника с помощью антенной решетки, формирующей малое количество диаграмм направленности на приём (в предельном случае как минимум трёх). Этот метод предлагается в связи с тем, что большинство известных методов оценивания угловых координат используют сигналы со всех элементов фазированной решетки, в то время как в ряде систем нет возможности обрабатывать данные сигналы в блоке вторичной обработки.

Ключевые слова: пеленгация, фазированная антенная решетка, ограниченные ресурсы.

Введение

Многие известные методы оценивания параметров сигналов с помощью фазированной антенной решетки используют сигналы с каждого элемента антенной решетки. Но в некоторых системах во время первичной обработки сигнала решается задача частотно-пространственной фильтрации, которая требует большого количества вычислительных ресурсов. Из-за ограниченного количества ресурсов в итоге формируется небольшое (меньше, чем количество элементов в антенной решетке) количество диаграмм направленности на приём (рис. 1). Но даже в таких системах встаёт вопрос об оценивании угла двух близкорасположенных друг к другу по углу источников излучения.

Рис. 1 – Пример четырех формируемых диаграмм направленности на приём

1. Математическая модель принимаемого сигнала

В данной работе рассмотрим ситуацию, когда на антенную решетку падают сигналы от двух источников. В общем случае принимаемый сигнал в каждой из приёмных диаграмм направленности зависит от следующих параметров: углы расположения источников относительно раскрыва антенной решетки, углы фазирования приёмных диаграмм направленности и фаза каждого из принимаемых сигналов. Математическую модель сигнала можно представить следующим образом. Для начала введём вектор, отвечающий за угол прихода сигнала [2, с. 9]:

$$S_n(\varphi) = \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} d(n-1) \sin\varphi\right); \quad n = (1 \div N)$$

где φ - угол прихода сигнала, d – расстояние между элементами АР, λ - длина волны сигнала, N – количество элементов в АР. Тогда для двух источников сигнала модель будет иметь вид:

$$\mathbf{Z} = a_1 \mathbf{S}(\varphi_1) + a_2 \mathbf{S}(\varphi_2) + \mathbf{X} \quad (1),$$

где φ_1 и φ_2 – углы прихода 1го и 2го сигналов соответственно, а a_1 и a_2 – их комплексные амплитуды, X – шум АР. При этом в i 'й диаграмме направленности на приём в определенный момент времени сигнал C_i будет иметь вид:

$$C_i = \mathbf{Z}^H \mathbf{V}(\theta_i) \quad (2),$$

где знак H означает эрмитово сопряжение, а вектор $\mathbf{V}(\theta_i)$ отвечает за угол фазирования i 'й диаграммы направленности на приём:

$$V_n(\theta_i) = \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} d(n-1) \sin \theta_i\right); \quad n = (1 \div N) \quad (3),$$

где θ_i – угол фазирования i 'й диаграммы направленности на приём, d – расстояние между элементами АР, λ – длина волны сигнала. Таким образом, конечное выражение для сигнала C_i представляет из себя суммирование всех сигналов с элементов фазированной антенной решетки с некоторыми фазовыми коэффициентами.

2. Метод оценивания угла с помощью разложения сигнала

Раскрывая выражение (2) с помощью (1) и (3), получим:

$$C_i = [a_1 S(\varphi_1)]^H \mathbf{V}(\theta_i) + [a_2 S(\varphi_2)]^H \mathbf{V}(\theta_i) + \mathbf{X}^H \mathbf{V}(\theta_i)$$

Представим C_i в виде суммы сигнальных компонент A_i , B_i и шумовой компоненты N_i :

$$A_i = [a_1 S(\varphi_1)]^H \mathbf{V}(\theta_i)$$

$$B_i = [a_2 S(\varphi_2)]^H \mathbf{V}(\theta_i)$$

$$N_i = \mathbf{X}^H \mathbf{V}(\theta_i)$$

$$C_i = A_i + B_i + N_i$$

В результате получим, что принимаемый сигнал можно представить в виде суммы сигнальных векторов и шумового вектора. Задачей предлагаемого метода является на основе совокупности сигналов с нескольких (более двух) диаграмм направленности на приём оценить углы источников излучения.

Основой метода является нахождение составляющих сигнала на основе предполагаемых углов прихода сигнала. Возможно это на основании того, что каждая из составляющих сигнала имеет свой “масштаб” в каждой из диаграмм направленности. Отношение сигналов в диаграммах под номерами i и j можно представить в виде:

$$\alpha(\varphi_1/\theta_i, \theta_j) = A_i/A_j = [a_1 S(\varphi_1)]^H \mathbf{V}(\theta_i) / [a_1 S(\varphi_1)]^H \mathbf{V}(\theta_j)$$

$$\beta(\varphi_2/\theta_i, \theta_j) = B_i/B_j = [a_2 S(\varphi_2)]^H \mathbf{V}(\theta_i) / [a_2 S(\varphi_2)]^H \mathbf{V}(\theta_j)$$

Используя $\alpha(\varphi_1/\theta_i, \theta_j)$ и $\beta(\varphi_2/\theta_i, \theta_j)$ можно найти одну из составляющих сигнала:

$$\begin{cases} C_i = A_i + B_i \\ C_j = A_j + B_j \\ C_i = \alpha(\varphi_1/\theta_i, \theta_j) \cdot A_j + \beta(\varphi_2/\theta_i, \theta_j) \cdot B_j \\ C_j = A_j + B_j \end{cases}$$

Выражая из данной системы A_j , получим:

$$A_j(\varphi_1, \varphi_2/\theta_i, \theta_j) = \frac{(C_i - C_j)(\beta + 1) - (C_i + C_j)(\beta - 1)}{(\alpha - 1)(\beta + 1) - (\alpha + 1)(\beta - 1)}$$

Учитывая, что углы φ_1, φ_2 нам неизвестны, то методом перебора будем оценивать их с помощью следующего решающего правила:

$$\varphi_1, \varphi_2 = \operatorname{argmin}(|A_j(\varphi_1, \varphi_2/\theta_i, \theta_j) - A_j(\varphi_1, \varphi_2/\theta_k, \theta_j)|)$$

Результаты оценки угла одного из источников показаны на рис. 2. Отношение сигнал-шум 10дБ, углы прихода сигналов от равномошных источников одинаково изменяются от 2х до 4х градусов.

Рис. 2 – Пример оценки угла одного из источников излучения. Углы прихода сигналов -2 и 2 градуса.

Заключение

В рамках проблемы оценивания угловых координат источников излучения с помощью малого количества диаграмм направленности на приём был предложен и рассмотрен метод, основанный на разложении сигнала на его составляющие. Данный метод можно использовать в условиях, когда в радиолокационной станции в рамках первичной обработки ресурсов оборудования хватает лишь на формирование малого количества диаграмм направленности. В отличие от таких известных методов, как, например, амплитудный метод пеленгации [3, с. 252], предложенный метод способен учитывать ситуацию, когда источник излучения не является единственным, в результате чего уменьшается ошибка оценки угла. Стоит отметить, что если диаграмма направленности антенной решетки достаточно узкая (антенная решетка состоит из большого количества элементов), то, возможно, применение предложенного метода будет излишним.

1. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках -М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
2. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой. 2007. 100 с.
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. — М.: Радиотехника. 2004. 320 с.